第38卷 第4期
2021年7月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 38 No. 4
Jul. 2021

晋西黄土区土地利用方式对土壤C:N:P化学计量特征及土壤理化性质的影响

胡亚伟[1]， 孙若修[1]， 申明爽[1]， 施政乐[1]， 刘 畅[1]， 徐勤涛[1]，
刘俊廷[1]， 张建军[1,2,3,4]

（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，山西 吉县 042200；3. 北京林业大学，水土保持国家林业局重点实验室，北京 100083；4. 北京林业大学，林业生态工程教育部工程研究中心，北京 100083）

摘 要： 为了阐明不同土地利用方式对土壤理化性质和生态化学计量特征的影响，以晋西黄土区典型人工混交林地、刺槐纯林地、经济林地、农田、荒草地为研究对象，测定了0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm、50~60 cm土层的容重、孔隙度以及有机质（TC）、全氮（TN）、全磷（TP）含量，分析土地利用方式与土壤理化性质及生态化学计量特征的关系，以期为土地资源的合理利用与生态服务功能提供依据。结果表明：（1）人工混交林地、刺槐纯林地、经济林地的容重（1.17 g·cm^{-3}、1.19 g·cm^{-3}、1.20 g·cm^{-3}）显著小于农田（1.31 g·cm^{-3}）和荒草地（1.38 g·cm^{-3}），刺槐纯林地TC和TN含量最大（9.94 g·kg^{-1}、0.88 g·kg^{-1}），农田最小（7.26 g·kg^{-1}、0.63 g·kg^{-1}），TP无差异（$P>0.05$）。随着土层深度的增加，容重逐渐增大，孔隙度逐渐减小，TC和TN逐渐减小，TP保持相对稳定。（2）人工混交林地、刺槐纯林地、经济林地的C:P（25.69、20.51、19.41）和N:P（2.23、1.82、1.58）大于农田（18.57、1.62），C:P和N:P随土层深度的增加而减小，C:N保持稳定。（3）C:N与总孔隙度正相关（$P<0.05$），C:P和N:P与土壤容重极显著负相关（$P<0.01$），与总孔隙度、非毛管孔隙度、TC、TN、C:N显著正相关（$P<0.05$）。通过各土地利用方式的土壤理化性质比较，林地的土壤养分状况显著高于农田，尤其以人工混交林地效果最佳，退耕还林有助于提高土壤质量。因此，在退耕还林还草过程中应多注意树种之间的搭配，而避免大面积营造单一林种。

关键词： 晋西黄土区；土地利用方式；土壤理化性质；化学计量特征

黄土高原是我国最主要的水土流失地区之一，更是生态环境脆弱带[1]，一方面原因是由于早期人为过度开垦、砍伐森林和过度放牧造成地表缺少植被保护[2]，另一方面是在黄土母质的影响下，渗透性能差、容易形成超渗产流，即使在较小雨量条件下也能形成严重水土流失所致[3]。水土流失不仅造成了水土资源的损失和浪费，更导致了土壤养分的大量流失，严重影响了土壤质量的维持和粮食产量的提高。植被恢复是遏制黄土高原地区水土流失的关键因素和有效途径，可以有效地缓解水土流失问题[4]，一方面植被根系可以固结土壤，另一方面植被可以阻止降雨直接打击地面，减少溅蚀的发生。而且植被恢复在减轻水土流失的同时，生态环境得到了明显的改善，土壤理化性质显著提高[5-6]。土壤的容重、孔隙度等是衡量土壤物理性质的重要指标，土壤碳、氮、磷含量是评价土壤质量和植被恢复状况的重要指标[7]。而生态化学计量学对于揭示碳、氮、磷的耦合关系具有重要意义[8]，土壤C:N可以反映微生物所利用土壤有机质的有效性，C:P反映了土壤微生物对土壤有效磷的代谢趋势，N:P常常作为预测指标来反映土壤中N和P对植被生长的限制。因此，土壤碳、氮、磷生态化学计量特征研究是当今研究的热点与核心问题[9]，对揭示土壤中养分的可获得性以及碳、氮、磷的循环和平衡机制具有

收稿日期： 2021-01-04； **修订日期：** 2021-03-09
基金项目： 国家重点研发计划（2016YFC0501704）
作者简介： 胡亚伟（1997-），男，硕士研究生，主要从事土壤生态研究. E-mail: 1299379825@qq.com
通讯作者： 张建军. E-mail: zhangjianjun@bjfu.edu.cn

重要意义。

不同土地利用方式会导致土壤中碳、氮、磷含量产生差异，一方面是不同土地利用方式下进入土壤的肥料和动植物残体，以及土壤中微生物的种类和数量存在差异，另一方面是由于不同土地利用方式的人为管理措施不同[10]，进而影响土壤循环过程，导致不同土地利用方式下碳、氮、磷含量的差异。20世纪90年代以来，为治理黄土高原地区严重的水土流失，实施了退耕还林还草工程，水土流失得以遏制，生态环境得以改善。但退耕还林后土壤理化性质变化过程，以及化学计量特征与植被的关系等问题尚需深入探讨。为此，信忠保等[11]研究发现土地利用方式显著影响土壤中有机质、全氮和速效磷含量；张晓霞等[12]研究表明退耕林地土壤容重、土壤总孔隙度和毛管孔隙度等物理性质较耕地均发生了显著的变化；李慧等[13]通过对不同林龄刺槐林地的研究发现土壤C:N在各年限间无显著差异，C:P和N:P随林龄而显著增加；赵晓单等[14]研究表明随着封育年限的增加，土壤C:N、C:P、N:P均较稳定，变异系数均不大，在封育30 a时趋于稳定。

目前关于黄土高原地区土地利用变化研究大多围绕土壤物理性质[15]及土壤养分含量[16-17]的变化展开，针对生态化学计量特征的研究主要围绕单一树种的不同退耕年限[18]及密度[19]展开，主要研究生态化学计量特征随退耕年限或种植密度的变化，而对于不同土地利用方式下土壤生态化学计量特征与土壤理化性质的相关关系研究较为缺乏。因此本研究以晋西黄土区退耕22 a的人工混交林地(刺槐侧柏混交)、人工刺槐纯林地、人工经济林地(苹果园)、荒草地为研究对象，以农田(玉米地)为对照，分析不同土地利用方式下土壤理化性质以及生态化学计量的特征及影响因素，选择最有利于土地质量改善和土壤生产力发展的土地利用类型，以期为晋西黄土区植被恢复与配置提供参考以及为土地资源的合理利用和生态服务功能的持续提高提供依据。

1　研究区概况与方法

1.1　研究区概况

研究区位于山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站所在地的蔡家川流域(36°14′27″~36°18′23″N，110°39′45″~110°47′45″E)，流域面积39.33 km²，海拔904~1592 m，为黄土梁状丘陵沟壑区，黄土母质，褐土。属暖温带大陆性气候，年均气温10 ℃。年平均降水量575.9 mm，多集中在7~10月。平均蒸发量1729 mm。平均日照时间2563.8 h，无霜期172 d。流域内人工植被以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等为主的纯林和混交林，经济林为苹果(*Malus pumila*)、梨(*Pyrus*)、杏(*Armeniaca vulgaris*)等果园，农作物以玉米(*Zea mays*)为主，荒草地植被以狗尾草(*Setaria viridis*)、苔草(*Carex rigescens*)等为主，该区域内人工林地退耕前均为耕地。

1.2　样地设置及调查

在蔡家川流域以玉米地作为对照，选择恢复年限(22 a)、土壤母质、海拔、坡度、坡向相似且退耕前均为耕地的4种土地利用方式，包括刺槐×侧柏混交林地、刺槐纯林地、苹果园地、荒草地作为调查样地，每种土地利用方式设置3个重复样地，样地大小为20 m×20 m，共计15个样地(图1)。在每个样地内进行每木检尺，记录树高、胸径、冠幅以及郁闭度等。使用罗盘仪测定每个样地的坡度、坡向；使用GPS数据采集仪测定海拔高度。样地的基本信息见表1。

1.3　样品采集及分析

试验于2017年7—8月进行，在所选定的5种土地利用方式的15个样地内进行土壤样品的采集，人工混交林地、人工刺槐纯林地、人工经济林地和荒草地退耕前均为耕地。采样时在每个样地的坡上、坡中、坡下3个位置各设置1个土壤剖面调查点，先测量地表枯落物厚度，然后挖取土壤剖面，按照0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm、50~60 cm分层取样，做好标记，将土样带回实验室，自然风干后采用四分法筛选土样，用0.25 mm土壤筛过筛后作为测定土壤的化学性质的样品[20]。同时在每个土壤剖面上按每10 cm一层用环刀(100 cm³)取原状土，在室内测定土壤的物理性质。土壤孔隙度、土壤容重采用环刀法进行测定，土壤中有机质(TC)、全氮(TN)、全磷(TP)分别采用重铬酸钾容量法、半微量凯式法、硫酸-混合加速剂消煮-蒸馏法进行测定[21]。

1.4　数据分析

利用Excel 2019整理数据，用SPSS 24软件进行单因素方差分析(ANOVA)，分析不同土地利用方式

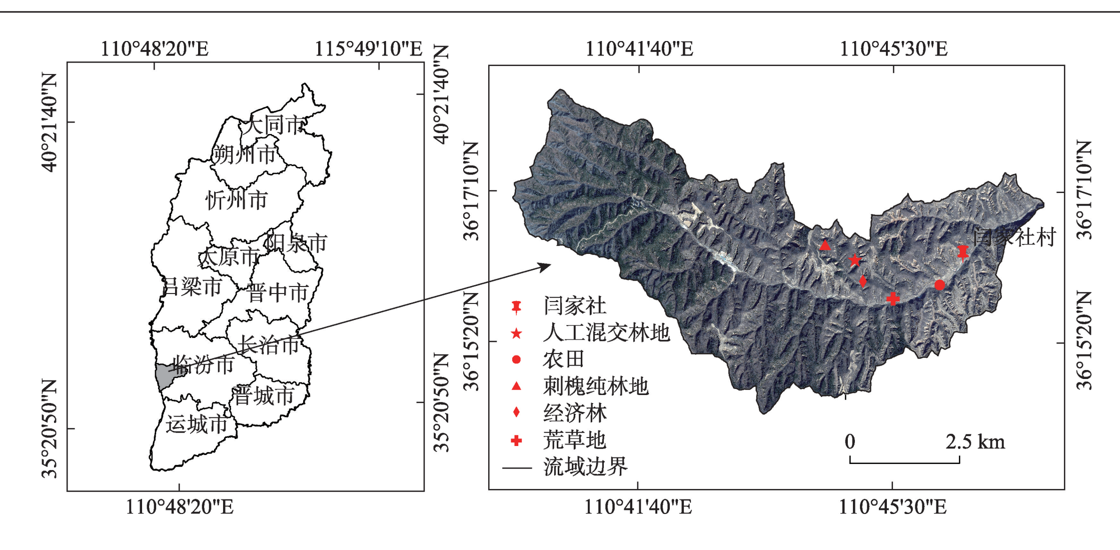


图1 研究区位置及采样点分布图

Fig. 1 Location of the study area and distribution of sampling points

表1 样地基本情况调查表

Tab. 1 Basic information questionnaire for sample plots

土地利用方式	样地	主要植物	海拔/m	坡度/(°)	坡向/(°)	土壤质地	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	胸径/cm	树高/m	枯落物厚度/cm
人工混交林地	1	刺槐、侧柏	1200	21	N75	黄绵土	6.33	67.81	25.86	8.38	6.04	6.5
	2	刺槐、侧柏	1112	20	N85	黄绵土	6.59	67.95	25.46	10.22	7.34	4.5
	3	刺槐、侧柏	1145	20	N86	黄绵土	6.84	67.83	25.33	11.70	8.02	5.9
刺槐纯林地	1	刺槐	1140	20	N80	黄绵土	5.32	67.30	27.38	11.25	9.26	4.8
	2	刺槐	1137	23	N78	黄绵土	5.85	65.51	28.64	12.61	9.86	5.1
	3	刺槐	1162	21	N85	黄绵土	5.67	66.44	27.89	11.89	9.22	3.9
经济林地	1	苹果树	1162	21	N70	黄绵土	4.35	67.70	27.59	8.69	3.22	3.0
	2	苹果树	1196	22	N73	黄绵土	4.57	66.50	28.93	8.99	3.25	2.8
	3	苹果树	1156	25	N80	黄绵土	4.28	66.94	28.78	9.71	3.49	3.7
农田	1	玉米	974	17	N82	黄绵土	2.84	64.72	32.44	–	–	0.0
	2	玉米	933	16	N72	黄绵土	3.56	64.88	31.56	–	–	0.0
	3	玉米	926	17	N83	黄绵土	3.41	64.81	31.78	–	–	0.0
荒草地	1	狗尾草、苔草	938	22	N76	黄绵土	3.95	65.49	30.56	–	–	2.7
	2	狗尾草、苔草	946	25	N82	黄绵土	3.56	65.16	31.28	–	–	1.9
	3	狗尾草、苔草	950	24	N70	黄绵土	3.78	65.92	30.30	–	–	3.5

注:枯落物厚度为分解层和未分解层之和。

或土层深度对土壤理化性质和化学计量比的影响。再进行数据方差齐性检验,若方差为齐性,用LSD法进行多重比较;若方差非齐性,则用Tamhane's T2法进行多重比较。运用Pearson correlation分析化学计量比与土壤孔隙度、土壤容重、有机质、全氮、全磷的相关性,运用Origin 2021制图。

2 结果与分析

2.1 土地利用方式对土壤物理性质的影响

由表2可见,退耕林地的土壤容重与农田和荒草地的土壤容重差异显著(P<0.05),而各退耕林地之间的差异不显著(P>0.05)。5种土地利用方式0~60 cm土层的容重从小到大依次为混交林地(1.17 $g\cdot cm^{-3}$)<刺槐纯林地(1.19 $g\cdot cm^{-3}$)<经济林地(1.20 $g\cdot cm^{-3}$)<农田(1.31 $g\cdot cm^{-3}$)<荒草地(1.38 $g\cdot cm^{-3}$)。各土地利用方式下土壤容重随着土层深度的增加而增加(图2),其中荒草地土壤容重的变化幅度最大(1.17~1.56 $g\cdot cm^{-3}$),变幅达25%,刺槐纯林地最小(1.09~1.26 $g\cdot cm^{-3}$),变幅仅为13.49%。

总孔隙度变化规律与土壤容重类似,退耕林地

表2 不同土地利用方式0~60 cm土层土壤理化性质平均值

Tab. 2 Mean values of physical and chemical properties of soil in 0-60 cm soil layer under different land use types

土壤理化性质	人工混交林地	刺槐纯林地	经济林地	农田	荒草地
土壤容重/(g·kg^{-1})	1.17±0.02c	1.19±0.03c	1.20±0.01c	1.31±0.01b	1.38±0.01a
总孔隙度/%	53.57±0.68ab	52.22±0.96b	54.84±0.13a	51.33±0.92b	46.12±0.86c
非毛管孔隙度/%	12.30±0.29a	12.07±0.32ab	12.26±0.05ab	12.03±0.26ab	11.83±0.15b
TC/(g·kg^{-1})	9.56±0.09b	9.94±0.17a	8.22±0.00d	7.26±0.17e	8.91±0.09c
TN/(g·kg^{-1})	0.84±0.01b	0.88±0.01a	0.67±0.00cd	0.63±0.01d	0.82±0.01b
TP/(g·kg^{-1})	0.37±0.01e	0.50±0.01a	0.41±0.01c	0.39±0.01d	0.47±0.00b
C:N	11.51±0.03b	11.01±0.1c	12.16±0.01a	11.51±0.07b	10.61±0.02d
C:P	25.69±0.05a	20.51±0.16b	19.41±0.28c	18.57±0.1c	18.77±0.09d
N:P	2.23±0.01a	1.82±0.03b	1.58±0.02d	1.62±0.03c	1.74±0.01c

注:不同小写字母表示同一土壤深度不同土地利用方式间差异显著($P<0.05$)。

的总孔隙度与农田和荒草地之间差异显著($P<0.05$),而退耕林地之间无显著差异($P>0.05$),各地类0~60 cm土层的总孔隙度依次为荒草地(46.12%)<农田(51.33%)<刺槐纯林地(52.22%)<混交林地(53.57%)<经济林地(54.84%);各土地利用方式的总孔隙度和非毛管孔隙度均随着土层深度的增加而减小(图2),其中经济林地总孔隙度的减小幅度最大,达6.3%,刺槐纯林地总孔隙度的减少幅度最小,为3.1%。各土地利用方式下非毛管孔隙度差异虽然均不显著($P>0.05$),但人工混交林的非毛管孔隙度最大,为12.3%,荒草地最小,为11.83%。混交林地非毛管孔隙度随深度的变化幅度最大,为1.51%,经济林地非毛管孔隙度随深度的变化幅度最小,仅为0.64%。

2.2 土地利用方式对土壤化学性质的影响

不同土地利用方式下TC、TN、TP量差异显著($P<0.05$),即土地利用方式对土壤化学性质具有显著影响(表2)。5种土地利用方式下土壤TC量和TN量大小顺序一致,纯林含量最高,依次为人工混交林地、荒草地、经济林地,农田含量最低。除经济林地20~30 cm层的土壤TC量和TN量低于30~40 cm层,农田20~30 cm土层的TC含量低于30~40cm层以外,其余各土地利用方式下的TC量和TN量均随土层深度的增加而减少(图3)。土壤TP量与TC量和TN量无论是土地利用方式还是深度上变化规律均不一致,纯林土壤TP量最高,然后依次为荒草地、经济林地、农田,人工混交林地含量最低。5种土地利用方式下土壤TP量随深度没有明显的变化规律,保持相对稳定的状态,人工混交林地变化范围为0.30~0.41 g·kg^{-1},刺槐纯林地0.43~0.58 g·kg^{-1},经济林地0.39~0.46 g·kg^{-1},农田0.38~0.43 g·kg^{-1},荒草地0.39~0.52 g·kg^{-1}。

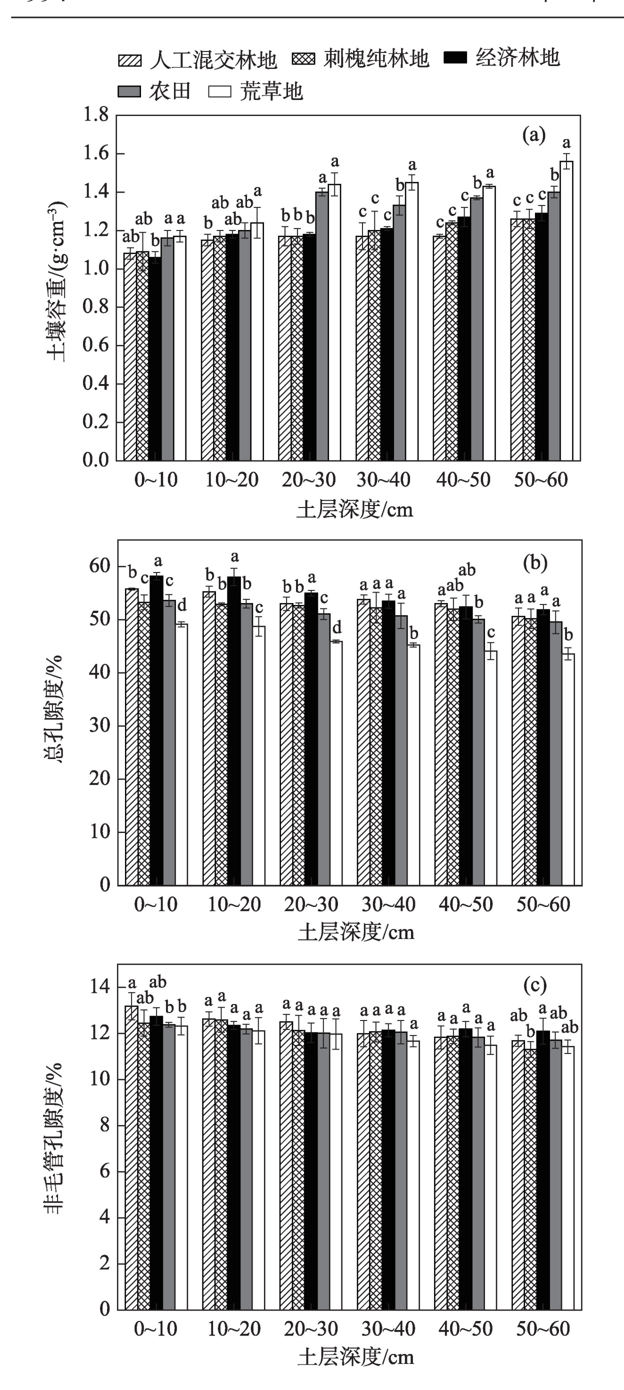
2.3 土地利用方式对土壤生态化学计量比的影响

土地利用方式对土壤生态化学计量比具有显著影响(表2),不同土地利用方式0~60 cm土层的C:N依次为经济林地(12.16)>农田(11.51)>人工混交林地(11.51)>刺槐纯林地(11.01)>荒草地(10.61),C:P依次为人工混交林地(25.69)>刺槐纯林地(20.51)>经济林地(19.41)>荒草地(18.77)>农田(18.57),N:P依次为人工混交林地(2.23)>刺槐纯林地(1.82)>荒草地(1.74)>农田(1.62)>经济林地(1.58)。

不同土地利用方式C:P和N:P都呈现随土层深度的增加逐渐减小的趋势(图4),C:N没有呈现出明显的变化规律。0~60 cm土层C:P和N:P变化范围分别为:人工混交林地C:P为11.38~40.30,N:P为1.16~3.87;刺槐纯林地C:P为11.34~38.46,N:P为1.13~3.05;经济林地C:P为13.48~34.07,N:P为1.07~2.67;农田C:P为10.44~26.32,N:P为1.14~2.40;荒草地C:P为10.41~28.02,N:P为1.28~2.33。0~60 cm土层C:N的变化范围分别为:混交林地9.8~12.78,刺槐纯林地10.01~12.60,经济林地10.89~12.74,农田9.15~14.57,荒草地8.12~12.04。

2.4 土壤理化性质和C:N:P计量比的相关性分析

由图5可见,TC与土壤容重极显著负相关($P<0.01$),与孔隙度显著正相关($P<0.05$);TN与土壤容重极显著负相关($P<0.01$),与非毛管孔隙度和TC极显著正相关($P<0.01$);TP与容重和孔隙度无关($P>0.05$)。C:N仅仅与总孔隙度显著正相关($P<0.05$),C:P和N:P与土壤容重极显著负相关($P<0.01$),与总



注：误差线为标准差（n=3），误差线上的不同字母表示同一土壤深度不同土地利用方式间差异显著（P<0.05）。下同。

图2 不同土地利用方式下0~60 cm土层土壤物理性质

Fig. 2 Soil physical properties of 0−60 cm soil layer under different land use types

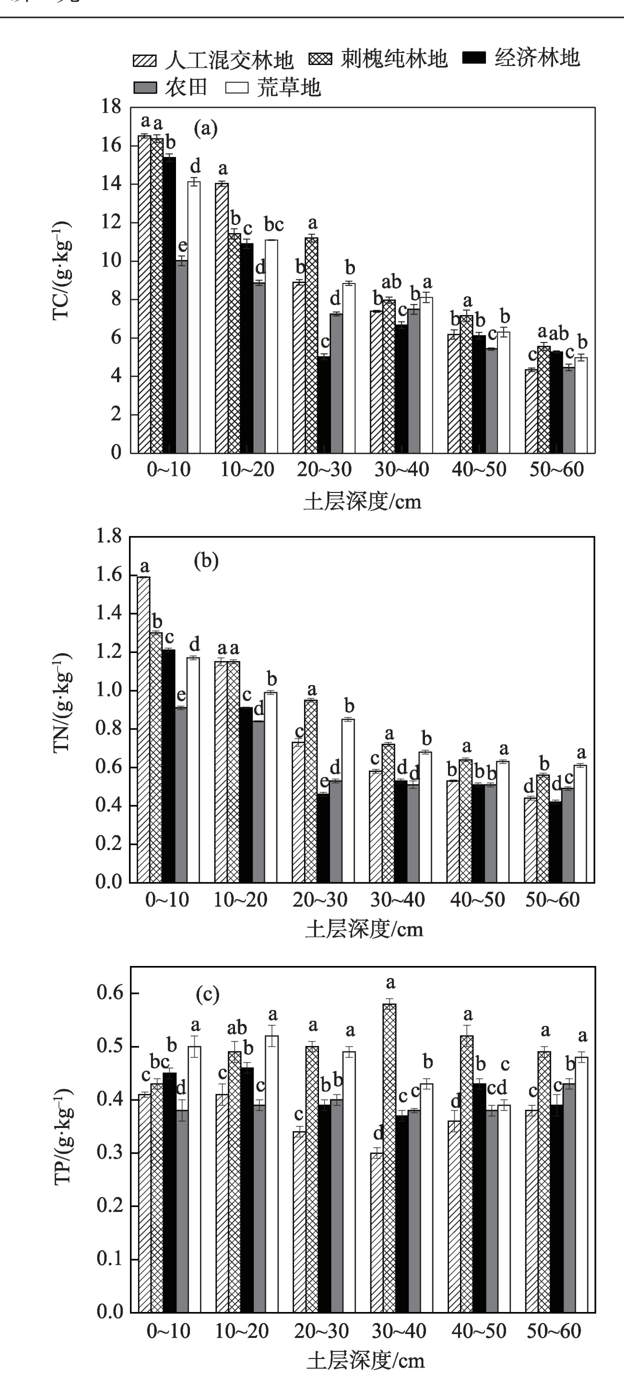


图3 不同土地利用方式下0~60 cm土层C、N、P含量

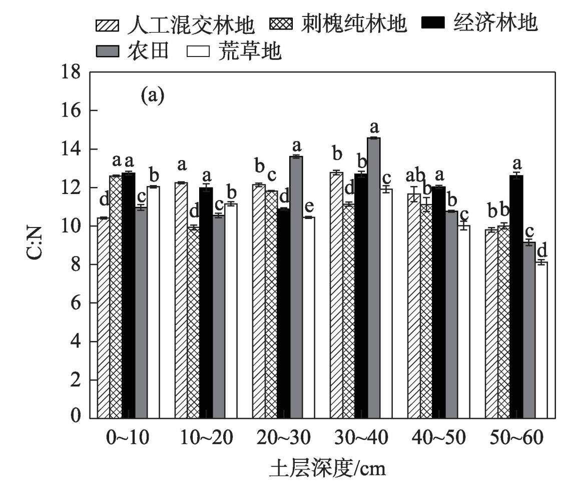
Fig. 3 The contents of C、N、P in 0−60 cm soil layer under different land use types

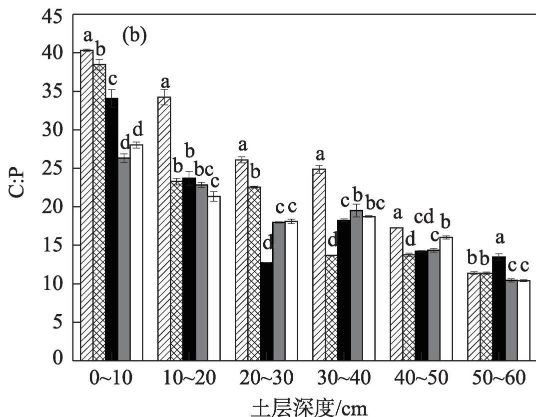
孔隙度、非毛管孔隙度、TC、TN、C:N显著正相关（P<0.05）。

3 讨论

3.1 土地利用方式对土壤物理性质的影响

本研究表明退耕林地的土壤物理性质明显好于农田和荒草地，说明退耕林地有利于改善土壤物理性质，其中以混交林地改善结果最为明显。与农田和荒草地相比，退耕林地的土壤容重减小，总孔隙度和非毛管孔隙度增大，土壤容重和孔隙度之间呈极显著负相关（P<0.01），这与李民义等[22]的研究结果相似。在植被恢复过程中林地表面有大量的枯落物以及腐殖质，微生物活动频繁，以及植物根系对土壤的改良作用，使得林地土壤容重降低，土





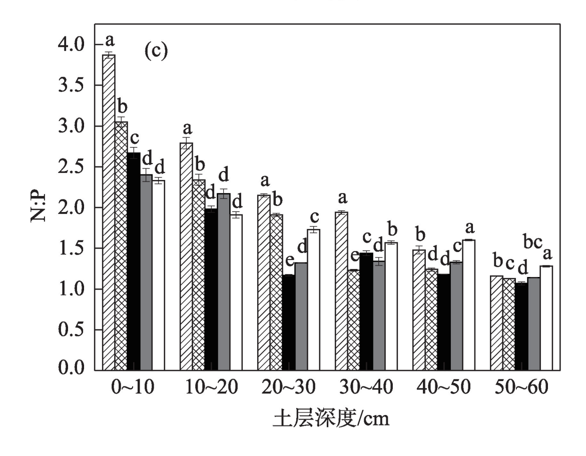
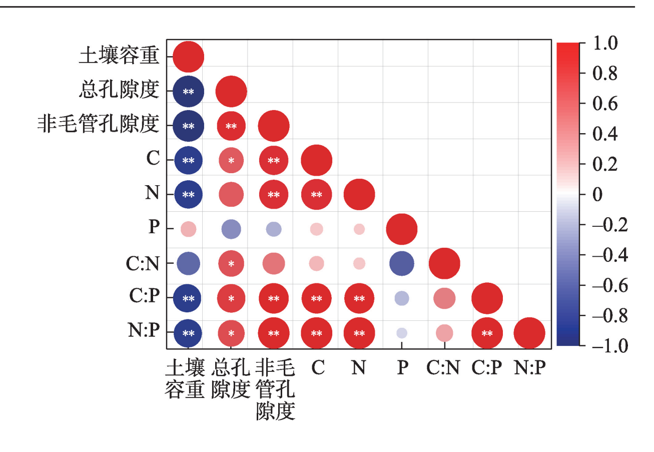


图4　不同土地利用方式下0~60 cm土层生态化学计量比

Fig. 4　Ecological stoichiometric ratios of 0−60 cm soil layers under different land use types

壤孔隙度增大。农田受到人为因素的影响,地表缺乏植被覆盖,更无枯枝落叶和腐殖质的保护,在雨滴击溅的影响下,土壤孔隙更容易堵塞,从而导致农田的土壤容重大于退耕林地和草地。还有研究表明,土壤有机质含量的变化会导致土壤物理性质发生变化[13,23],曹国栋等[24]研究发现土壤有机质含量变化是导致土壤物理性质变化的主要原因,本研究中也得出了相似的结论,有机质与土壤容重呈显



注:*表示P<0.05的显著性;**表示P<0.01的显著水平。

图5　5种土地利用方式土壤理化性质和C:N:P计量比的相关性分析

Fig. 5　Correlation analysis of physical and chemical properties of soil and measurement ratio of C:N:P in 5 land use types

著负相关(P<0.05),与毛管孔隙度和非毛管孔隙度呈正相关(P<0.05)。因为土壤有机质在土壤中最主要最直接的作用就是改良土壤结构、促进土壤团聚体形成更多的孔隙,从而改善土壤通气性和透水性[25]。人工混交林地和刺槐纯林地由于地表枯落物的原因有机质含量较高,促进了土壤颗粒胶结,形成了结构稳定的团聚体,改善了土壤结构,而农田由于反复轮作,且每次作物秸秆均被收割,秸秆中含有的养分无法返还给土壤,导致土壤中有机质含量较少,土壤容重较大[26]。经济林地有机质含量较低但土壤容重较小是因为每年要对果园进行除草和松土,使得经济林地土壤容重较小,孔隙度较大。退耕林地中,人工混交林地对土壤结构的改良作用要好于刺槐纯林地和经济林地,人工混交林地枯落物要大于刺槐纯林地和经济林地,有机质含量较高,因此人工混交林这种造林方式对土壤的改良作用更好。

本研究中不同土地利用方式下随着土层深度的增加,土壤容重都逐渐增大,土壤孔隙逐渐减小。这是因为林地表层都有较厚的枯落物以及腐殖质,因此表层的土壤容重低于深层,随着土层深度的增加,枯落物以及腐殖质的影响逐渐降低,根系含量尤其是细根和毛根含量逐渐减小,必然导致容重变大,孔隙度减小[22]。农田表层土壤受人为耕作的影响容重虽然较低,孔隙度较大,但深层由于犁底层的存在[12],因此也同样呈现出随着深度增加容重增加,孔隙度减小的规律。

3.2 土地利用方式对土壤化学性质的影响

5种土地利用方式下，土地利用方式对土壤TC、TN和TP量有显著影响($P<0.05$)，退耕还林后林地的TC、TN量均高于农田和荒草地，与李洁等[27]研究结果一致。土壤中的TC和TN的主要来源是枯枝落叶以及动物的残体和粪便，退耕林地和荒草地相对于农田来说，枯落物量和根系更加丰富，返还给土壤中的养分更多。在退耕林地中，刺槐纯林地的TC和TN要高于人工混交林地，这与之前研究结果有所不同，可能是因为林地内光照、温度、水分等环境因素条件不同影响了酶的活性[28]，以及人为踩踏等原因，影响了枯落物分解的速率，从而导致人工混交林地中TC和TN含量略微低于纯林。农田土壤的TC和TN量最低，主要是因为农作物将C、N吸收和同化后，被农民收割带走，无法再回到农田所致，因此，为了保证农田的肥力和给农作物提供一个良好的生长条件，秸秆还田和施用农家肥成为必然选择。土壤TC和TN量之间呈现极显著正相关($P<0.01$)，因为土壤中的大部分的氮元素以有机氮的形式存在于有机质中，因此有机质含量越高，土壤中氮素含量也越高[29]。本研究中TP量变化范围为0.37~0.50 $g\cdot kg^{-1}$，远远低于全球土壤平均含磷量2.8 $g\cdot kg^{-1}$[30]，这与杨佳佳等[31]研究结果一致。一方面是由于土壤对P的吸附作用，另一方面是由于黄土高原地区水土流失严重，大量的磷随着表层土壤的侵蚀与地表径流一起进入沟道，使得坡面土壤中磷严重缺乏，同时被地表径流带走的磷进入河水中还会造成水体的富营养化。因此在黄土高原地区大力开展植被恢复与重建，不仅可以促进坡面土壤肥力的恢复和防治水土流失，还对减少下游水体的富营养化和水质安全具有重要意义。

各土地利用方式下土壤TC和TN随着土层深度的增加而减少，而TP含量呈现波动，无明显变化规律。三者在土壤剖面上呈现不同的分布状况主要是因为三者的来源不同，退耕林地和荒草地C、N主要来自于枯落物和根系分解产生的有机质，且N还受到大气沉降的影响[30]。枯落物大多聚集在土壤表层，呈现明显的"表聚现象"[22]，土壤表层虽然根系较细，但数量远多于土壤深层，因此，表层枯落物和根系分解产生的有机质比深层多，土壤TC和TN含量随着土层深度的增加而逐渐减小。农田土壤中C、N主要来自于少量秸秆的分解和施用有机肥，因此，表层土壤中含量也相对较高。土壤中P的来源相对单一，主要是岩石的风化以及淋溶，并且P是一种沉积性的矿物元素，在土壤中不易迁移，因此，整个土层分布相对均匀，没有明显的规律性。

3.3 土地利用方式对土壤生态化学计量比的影响

土壤C:N与有机质的分解速率呈负相关，本研究中C:N的平均值为11.34，与中国土壤C:N平均值相近(中国土壤C:N平均值10~12)。刺槐纯林地、人工经济林地、荒草地的表层土壤C:N高于底层，与尹秋龙等[19]研究结果一致，主要是因为土壤表层枯落物易受到枯落物养分归还的影响，养分首先集中在土壤表层然后逐层向下迁移，因此土壤表层C:N高于底层。而人工混交林地土壤表层C:N值较低可能是由于环境和人为踩踏等因素导致枯落物分解速率降低，表层养分归还较少所导致。除去表层外，其余各层土壤C:N相对稳定，主要是因为植物、枯落物和人为活动影响了土壤碳氮养分的垂直分布格局和变化速率，导致土壤中的TC、TN量呈现出相似的变化趋势，因而使土壤C:N呈现相对稳定。各土地利用方式下C:P和N:P都呈现随土层深度的增加逐渐减小的趋势，与朱秋莲等[32]研究结果一致。一方面由于各土地利用方式TC、TN量随着土层深度的增加逐渐降低，另一方面由于TP在土壤中的迁移率较低处于一个相对稳定的状态，就导致C:P、N:P随着土层深度增加而减小[33]。通过相关性分析可以看出，土壤C:P和N:P与土壤TC和TN含量呈极显著正相关($P<0.01$)，与土壤TP含量无显著关系，这也与土壤中TC、TN、TP含量变化有关。土壤C:P和N:P还与土壤容重呈极显著负相关($P<0.01$)，与孔隙度呈显著正相关($P<0.05$)，因为，土壤中TC在改良土壤结构、促进土壤团聚体形成更大的孔隙方面具有显著作用，而TC和TN含量又具有一致性，与土壤容重和孔隙度之间也具有相关关系。在土地利用方式方面，可以明显看出退耕林地的C:P、N:P值要显著大于农田和荒草地($P<0.05$)。退耕林地的TC、TN主要来源于枯枝落叶的分解，虽然荒草地也存在分解枯枝落叶这种现象，但林地的生物量远大于草地的生物量，产生的枯枝落叶量也就存在明显的差异，也就导致林地的TC、TN量要大于荒草地。农田虽然也由于作物秸秆还田对于土壤中的TC、TN量有一定的补充，但由于在作物生长过程中对它们的消耗以及作物秸秆有限的影响，TC、TN量

也低于林地[34],因此退耕林地的C:P、N:P值要显著大于农田和荒草地。而在三种退耕林地中,人工混交林地的效果要明显优于其他两种造林方式,因此,在TP都相对稳定的情况下,说明人工混交林地在提高TC和TN量,改良土壤质量方面比刺槐纯林地、人工经济林地、农田和荒草地更有优势。

4 结 论

综上所述,5种土地利用方式下土壤理化性质具有差异,其中退耕林地的各项指标要优于农田和荒草地,说明退耕还林在改善土壤结构,增加土壤养分含量方面发挥着重要作用。人工混交林地的土壤理化性质优于人工纯林地和经济林地,表明营造混交林地更有利于当地土壤质量提高。3种土壤生态计量比与土壤理化性质以及其本身存在不同的相关关系,C:N仅仅与总孔隙度显著相关($P<0.05$),C:P和N:P与土壤容重极显著负相关($P<0.01$),C:P和N:P与总孔隙度、非毛管孔隙度、TC、TN、C:N显著正相关($P<0.05$)。因此,建议在晋西黄土区人工植被恢复过程中选择营造异龄复层混交林,使人工林地更好的向天然林地演替,在水土流失防治和土壤质量提高方面更好的发挥作用。

参考文献(References):

[1] 张宝庆,吴普特,赵西宁. 近30 a黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 287-293, 400. [Zhang Baoqing, Wu Pute, Zhao Xining. Detecting and analysis of spatial and temporal variation of vegetation cover in the Loess Plateau during 1982-2009[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(4): 287-293, 400.]

[2] 李锐. 黄土高原水土保持工作70年回顾与启示[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 298-301. [Li Rui. Review and enlightenments of soil and water conservation on Loess Plateau in past 70 years[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 298-301.]

[3] 李宗善,杨磊,王国梁,等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7398-7409. [Li Zongshan, Yang Lei, Wang Guoliang, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7398-7409.]

[4] Wang Rui, Dong Zhibao, Zhou Zhengchao, et al. Effect of vegetation patchiness on the subsurface water distribution in abandoned farmland of the Loess Plateau, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 746: 141416.

[5] 冯德枫,包维楷. 土壤碳氮磷化学计量比时空格局及影响因素研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(2): 400-408. [Feng Defeng, Bao Weikai. Review of the temporal and spatial patterns of soil C: N: P stoichiometry and its driving factors[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2017, 23(2): 400-408.]

[6] 曾冬萍,蒋利玲,曾从盛,等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5484-5492. [Zeng Dongping, Jiang Liling, Zeng Congsheng, et al. Research progress in ecological stoichiometry and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5484-5492.]

[7] 刘玉林,朱广宇,邓蕾,等. 黄土高原植被自然恢复和人工造林对土壤碳氮储量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2163-2172. [Liu Yulin, Zhu Guangyu, Deng Lei, et al. Effects of natural vegetation restoration and afforestation on soil carbon and nitrogen storage in the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7): 2163-2172.]

[8] 赵海燕,张剑,刘冬,等. 不同沼泽湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 618-626. [Zhao Haiyan, Zhang Jian, Liu Dong, et al. Characteristics and determining factors for ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus in different marsh wetlands[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 618-626.]

[9] Sterner Robert W, Elser James J, Vitousek Peter. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere[M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.

[10] 罗由林,李启权,王昌全,等. 近30年川中丘陵区不同土地利用方式土壤碳氮磷生态化学计量特征变化[J]. 土壤, 2016, 48(4): 726-733. [Luo Youlin, Li Qiquan, Wang Changquan, et al. Last 30 a changes of C, N and P ecological stoichiometry of different land use types in hilly area of Mid-Sichuan basin, Southwest China [J]. Soils, 2016, 48(4): 726-733.]

[11] 信忠保,余新晓,张满良,等. 黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用的土壤养分特征[J]. 干旱区研究, 2012, 29(3): 379-384. [Xin Zhongbao, Yu Xinxiao, Zhang Manliang, et al. Soil nutrient characteristics under different land use types in a gully-hilly region of the Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(3): 379-384.]

[12] 张晓霞,杨宗儒,查同刚,等. 晋西黄土区退耕还林22年后林地土壤物理性质的变化[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 416-424. [Zhang Xiaoxia, Yang Zongru, Zha Tonggang, et al. Changes in the physical properties of soil in forestlands after 22 years under the influence of the Conversion of Cropland into Farmland Project in Loess region, western Shanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 416-424.]

[13] 李慧,王百田,刘涛. 晋西黄土区不同森林树种及其林地土壤养分含量的变化[J]. 林业科学研究, 2016, 29(4): 587-595. [Li Hui, Wang Baitian, Liu Tao. The nutrient content variations of different forest species and the forest soil in Loess Region of western Shanxi[J]. Forest Research, 2016, 29(4): 587-595.]

[14] 赵晓单, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原不同封育年限草地土壤与植物根系的生态化学计量特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1541−1551. [Zhao Xiaodan, Zeng Quanchao, An Shaoshan, et al. Ecological stoichimetric characteristics of grassland soils and plant roots relative to enclosure history on the Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(6): 1541−1551.]

[15] 谭学进, 穆兴民, 高鹏, 等. 黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(2): 713−722. [Tan Xuejin, Mu Xingmin, Gao Peng, et al. Effects of vegetation restoration on changes to soil physical properties on the Loess Plateau[J]. China Environmental Science, 2019, 39(2): 713−722.]

[16] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2292−2296. [Gong Jie, Chen Liding, Fu Bojie, et al. Effects of land use and vegetation restoration on soil quality in a small catchment of the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(12): 2292−2296.]

[17] 王莉, 张强, 牛西午, 等. 黄土高原丘陵区不同土地利用方式对土壤理化性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 14(4): 53−56. [Wang Li, Zhang Qiang, Niu Xiwu, et al. Effects of different land-uses on soil physical and chemical properties in the Loess Plateau of Shanxi Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 14(4): 53−56.]

[18] 李慧, 许亚东, 王涛, 等. 不同林龄刺槐人工林植物与土壤C、N、P化学计量特征演变[J]. 西北农业学报, 2018, 27(11): 1651−1659. [Li Hui, Xu Yadong, Wang Tao, et al. Variation of carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in plant and soil following stand age of *Robinia Pseudoacacia* plantation[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2018, 27(11): 1651−1659.]

[19] 尹秋龙, 寇萌, 焦菊英, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植物群落的土壤养分及其化学计量特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 62−66. [Yin Qiulong, Kou Meng, Jiao Juying, et al. Characteristics of soil nutrients and stoichiometry in different communities in hilly-gullied region of Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1): 62−66.]

[20] 刘俊廷, 张建军, 王恒星, 等. 晋西黄土区不同退耕年限油松林草本多样性与土壤养分的关系[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 400−409. [Liu Junting, Zhang Jianjun, Wang Henxing, et al. Relationship between species diversity at the herbaceous stratum and soil nutrients in *Pinus tabulaeformis* plantations of various ages on the Loess Plateau of western Shanxi Proviece, China[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 400−409.]

[21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000. [Bao Shidan. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.]

[22] 李民义, 张建军, 王春香, 等. 晋西黄土区不同土地利用方式对土壤物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 125−130, 137. [Li Minyi, Zhang Jianjun, Wang Chunxiang, et al. Effects of land use types on soil physical properties in Loess Plateau of western Shanxi[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(3): 125−130, 137.]

[23] Deng Yusong, Xia Dong, Cai Chongfa, et al. Effects of land uses on soil physic-chemical properties and erodibility in collapsing-gully alluvial fan of Anxi County, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(8): 1863−1873.

[24] 曹国栋, 陈接华, 夏军, 等. 玛纳斯河流域扇缘带不同植被类型下土壤物理性质[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 195−204. [Cao Guodong, Chen Jiehua, Xia Jun, et al. Analysis of soil physical properties under different vegetation types in the alluvial fan area of Manas River watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(1): 195−204.]

[25] 梁士楚, 苑晓霞, 卢晓明, 等. 漓江水陆交错带土壤理化性质及其分布特征[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 2752−2761. [Liang Shichu, Yuan Xiaoxia, Lu Xiaoming, et al. Soil physico-chemical properties and distribution characteristics in an aquatic-terrestrial ecotone of the Lijiang River, Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8): 2752−2761.]

[26] 王凯博, 时伟宇, 上官周平. 黄土丘陵区天然和人工植被类型对土壤理化性质的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 80−86. [Wang Kaibo, Shi Weiyu, Shanguan Zhouping. Effects of natural and artificial vegetation types on soil properties in Loess Hilly region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(15): 80−86.]

[27] 李洁, 滑磊, 任启文, 等. 冀西北3种植被恢复类型土壤理化性质差异及肥力评价[J]. 生态环境学报, 2020, 29(8): 1540−1546. [Li Jie, Hua Lei, Ren Qiwen, et al. Physicochemical properties difference and fertility evaluation of soil within three types vegetation restoration in Northwest Hebei[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(8): 1540−1546.]

[28] Wei Zhang, Weichao Liu, Miaoping Xu, et al. Response of forest growth to C: N: P stoichiometry in plants and soils during *Robinia pseudoacacia* afforestation on the Loess Plateau, China[J]. Geoderma, 2019, 337: 280−289.

[29] 徐海军, 姚琴, 孙宇峰, 等. 大庆地区不同土地利用下土壤空间异质性研究[J]. 中国土壤与肥料, 2020, 57(1): 24−30. [Xu Haijun, Yao Qin, Sun Yufeng, et al. Spatial heterogeneity of soil properties under different land use patterns in Daqing area, China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020, 57(1): 24−30.]

[30] 章广琦, 张萍, 陈云明, 等. 黄土丘陵区刺槐与油松人工林生态系统生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1328−1336. [Zhang Guangqi, Zhang Ping, Chen Yunming, et al. Stoichiometric characteristics of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabuliformis* plantation ecosystems in the Loess hilly-gully region, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(4): 1328−1336.]

[31] 杨佳佳, 张向茹, 马露莎, 等. 黄土高原刺槐林不同组分生态化学计量关系研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 133−142. [Yang Jiajia, Zhang Xiangru, Ma Lusha, et al. Ecological stoichiometric relationships between components of *Robinia pseudoacacia* forest in Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(1): 133−142.]

[32] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生

态化学计量特征[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4674–4682. [Zhu Qiulian, Xing Xiaoyi, Zhang Hong, et al. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly-gully region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(15): 4674–4682.]

[33] Liu Y, Fang Y, An S. How C: N: P stoichiometry in soils and plants responds to succession in *Robinia pseudoacacia* forests on the Loess Plateau, China[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 475: 118394.

[34] 高君亮, 罗凤敏, 高永, 等. 农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5594–5602. [Gao Junliang, Luo Fengmin, Gao Yong, et al. Ecological soil C, N, and P stoichiometry of different land use patterns in the agriculture-pasture ecotone of Northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5594–5602.]

Effects of land use types on the stoichiometric characteristics of soil C:N:P and the physical and chemical properties of soil in western Shanxi loess region

HU Yawei[1], SUN Ruoxiu[1], SHEN Mingshuang[1], SHI Zhengle[1], LIU Chang[1], XU Qintao[1], LIU Junting[1], ZHANG Jianjun[1,2,3,4]

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Ji County Station in Shanxi, Chinese National Ecosystem Research Network, Jixian 042200, Shanxi, China; 3. Key Laboratory of State Forestry Administration om Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4. Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The aim of this study was to illustrate the effect of different types of land use on the physical and chemical properties of soil, as well as the influence of the ecological characteristics of chemical measurements in western Shanxi loess region, China. The study area included typical artificial mixed forests, *Robinia pseudoacacia* pure forests, economic forest lands, farmland, and grassland. Specifically, soil layers of 0–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm, 30–40 cm, 40–50 cm, and 50–60 cm were measured for soil bulk density, porosity, organic matter (TC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) content, analysis of land use, soil physical and chemical properties, and the relationship between the ecological characteristics of chemical metrology to provide a basis for the rational use of land resources and ecological service functions. The bulk density (1.17 $g\cdot cm^{-3}$, 1.19 $g\cdot cm^{-3}$, 1.20 $g\cdot cm^{-3}$) of artificial mixed forest land, *Robinia pseudoacacia* pure forest, and economic forest land were significantly lower than that of cropland (1.31 $g\cdot cm^{-3}$) and wasteland (1.38 $g\cdot cm^{-3}$). The contents of TC and TN in *Robinia pseudoacacia* pure forest were the highest (9.94 $g\cdot kg^{-1}$, 0.88 $g\cdot kg^{-1}$, respectively), while those in the cropland were the lowest (7.26 $g\cdot kg^{-1}$, 0.63 $g\cdot kg^{-1}$, respectively), but TP showed no difference ($P>0.05$). Increased soil depth resulted in gradually increasing bulk density, gradually decreasing porosity, gradually decreasing TC and TN, and a relatively stable TP. The C:P (25.69, 20.51, 19.41) and N:P (2.23, 1.82, 1.58) of artificial mixed forest land, *Robinia pseudoacinia* pure forest land, and economic forest land, respectively, were higher than those of farmland (18.57, 1.62, respectively). The C:P and N:P decreased with increasing soil depth, but C:N remained stable. C:N was positively correlated with total porosity ($P<0.05$). C:P and N:P were significantly negatively correlated with soil bulk density ($P<0.01$), and significantly positively correlated with total porosity, non-capillary porosity, TC, TN, and C:N ($P<0.05$). The soil nutrient status of the forest land was significantly higher than that of the farmland, with the best effect found in the artificial mixed forest land. The conversion of cultivated land to forest improved soil quality. Thus, when returning cultivated land to forest and grassland, more attention should be paid to the collocation of tree species, instead of creating a single species forest over a large area.

Keywords: loess region of western Shanxi; land use types; soil physical and chemical properties; stoichiometric characteristics